

УДК 169.227.3

Хлестов В.М.<sup>1</sup>, Фролова З.В.<sup>2</sup>**ОСОБЕННОСТИ ОТЖИГА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ  
С ДЕФОРМАЦИОННОГО НАГРЕВА**

*Рассмотрены особенности распада аустенита и морфологии продуктов его превращения при отжиге инструментальных сталей с деформационного нагрева. В эвтектоидной и заэвтектоидных сталях формируется пластинчатый перлит, а в ледебуритной – зернистый. Обсуждены возможные причины этого различия.*

Отжиг изделий с деформационного нагрева существенно снижает энергозатраты и себестоимость продукции [1], поэтому установление оптимальных параметров этого процесса для разных групп инструментальных сталей является актуальной задачей. Наиболее существенно от обычного отжига он отличается тем, что вследствие гораздо более высокой температуры нагрева и деформации переохлажденный аустенит перед распадом и во время распада имеет иное строение и иной химический состав, чем аустенит сформированный при нагреве под отжиг. Например, при нагреве стали Р6М5 под отжиг в аустените растворяется примерно 2 % Cr и по 0,3-0,5 % W и Mo [2], а при нагреве под прокатку (1150 °С) – почти весь хром и по 1,5-2 % Mo и W. В результате устойчивость аустенита возрастала более, чем в 10 раз и еще больше в стали Х5МФ, в которой при нагреве под прокатку карбиды полностью растворялись в аустените [3].

Столь большое повышение времени распада аустенита может сделать нерациональным отжиг изделий с деформационного нагрева. Однако обогащает то, что деформация сильно понижает устойчивость аустенита в перлитной области [4], в связи с чем она в значительной мере может уменьшить или даже полностью нейтрализовать неблагоприятное действие высокотемпературного нагрева. Так, в результате прокатки стали Р6М5 с суммарным обжатием на 50 % при 950-900 °С после нагрева на 1150 °С устойчивость аустенита в перлитной области уменьшалась в 5-6 раз [3]. Все же это снижение не полностью нейтрализовало действие высокотемпературного нагрева: время полного распада аустенита при отжиге с прокатного нагрева оставалось все еще примерно вдвое длиннее, чем после нагрева под обычный отжиг.

Приведенные данные показывают, что при выборе режима охлаждения для отжига с деформационного нагрева необходимо руководствоваться данными по кинетике распада аустенита после его нагрева под прокатку или ковку и горячей деформации, а не после нагрева при стандартном отжиге. В связи с этим представляется неправомерным утверждение авторов учебника [5], что после горячей деформации достаточно применить контролируемое охлаждение или изотермическую выдержку таким же образом, как и при обычном отжиге. Аналогичное заключение, не основывающееся на особенностях кинетики перлитного распада аустенита после горячей прокатки, приводится и в монографии [2].

Вторая особенность отжига с прокатного нагрева, которая так же не учитывается указанными авторами при обсуждении возможности и целесообразности его проведения, это существенно иное микро- и субмикростроение стали после завершения горячей деформации по сравнению со сталью, нагретой под отжиг. Известно [6], что в горячедеформированной стали, особенно если деформация завершается при относительно невысокой (800-900 °С) температуре, в аустените формируется либо полигональная, либо ячеистая субструктура. Первая и еще в большей мере вторая существенно влияют не только на кинетику образования перлита, но и на его морфологию, следовательно, и на результаты отжига.

<sup>1</sup> ПГТУ, канд. техн. наук, доцент<sup>2</sup> ПГТУ, канд. техн. наук, инженер

Для экспериментальной проверки высказанных суждений об особенностях отжига с деформационного нагрева были проведены эксперименты на сталях, представляющих три группы: эвктикоидной У8, заэвктикоидных 7Х3 и Х5МФ и ледебуритной Р6М5. Все они были промышленного производства. Их химический состав приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследованных сталей

Марка стали	Содержание элементов в % по массе						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V
У8	0.77	0.27	0.87	-	-	-	-
7Х3	0.67	0.23	0.32	3.5	-	-	-
Х5МФ	1.02	0.30	0.70	5.15	1.15	-	0.31
Р6М5	0.84	0.25	0.30	4.0	5.0	6.5	1.9

Плоские образцы толщиной 2-5 мм обрабатывали в основном по двум режимам, приведенным на рис. 1. Режим 1 имитирует отжиг с прокатного нагрева, а режим 2 – обычный отжиг. Все стали под прокатку нагревались до 1150 °С и выдерживались при этой температуре 10 минут, затем под-

стуживались в малой

трубчатой печи до температуры, на 20-50 °С более высокой, чем температура окончания прокатки (табл. 2). Прокатку образцов осуществляли на лабораторной установке [4] за 3 прохода с обжатием на 20 % в каждом проходе. Таким образом, в опытах имитировали завершающую стадию горячей прокатки, так как именно последние 2 – 3 обжатия оказывают основное влияние на внутреннее строение стали к моменту завершения деформации и на последующие процессы, развивающиеся при охлаждении [4, 6].

В ряде случаев опыты проводили по другим режимам, чем приведенным на рис. 1. О них будет сказано при рассмотрении и обсуждении экспериментальных данных.

Кинетику перлитного превращения изучали на магнитной установке (стали У8 и 7Х3) и специальном dilatометре. Устройство этих установок и методика проведения экспериментов на них подробно описаны в [4].

Результаты опытов по кинетике перлитного распада показали, что совместное действие высокотемпературного нагрева и последующей деформации на устойчивость переохлажденного аустенита в очень сильной мере зависит от химического состава стали. В нелегированной стали У8 повышение температуры нагрева от 750 до 1150 °С лишь в 1,3 – 1,5 раза увеличивало время перлитного распада, а деформация перегретого аустенита на 50 % в интервале 800 – 750 °С снижала его устойчивость в 2,5 – 3 раза. В результате перегретый и затем деформированный аустенит оказывается примерно вдвое менее устойчивым, чем нагретый под отжиг, поэтому с точки зрения перлитного распада отжиг с прокатного нагрева может производиться с более быстрым охлаждением, чем обычный отжиг.

Существенно иная картина наблюдалась при изучении кинетики превращения аустенита

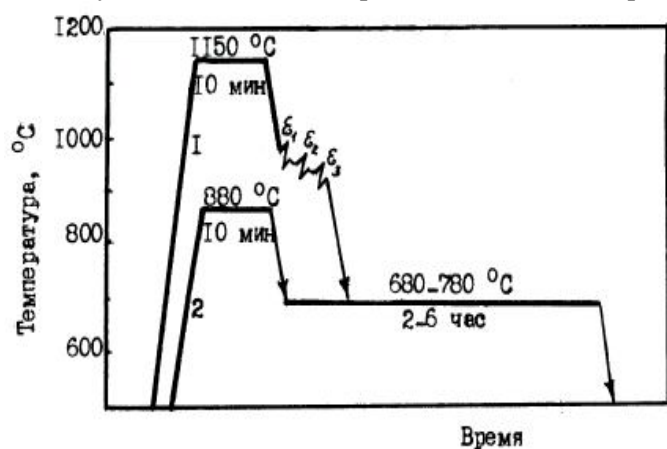


Рис. 1- Основные режимы обработки стали Р6М5  
1- отжиг с прокатного нагрева;

легированной заэвктикоидной стали 7Х3. Из рис. 2а видно, что высокотемпературный нагрев сильно повышает устойчивость аустенита, а деформация перегретых образцов столь же сильно понижает ее. В результате оказывается, что для полного перлитного распада аустенита стали 7Х3 необходимо примерно одинаковое время, как при обычном отжиге, так и при отжиге с деформационного нагрева.

Особо сильное влияние высокотемпературный нагрев оказывал на перлитное превращение более легированной стали

2- типовой изотермический отжиг.

X5MФ (рис. 2б).

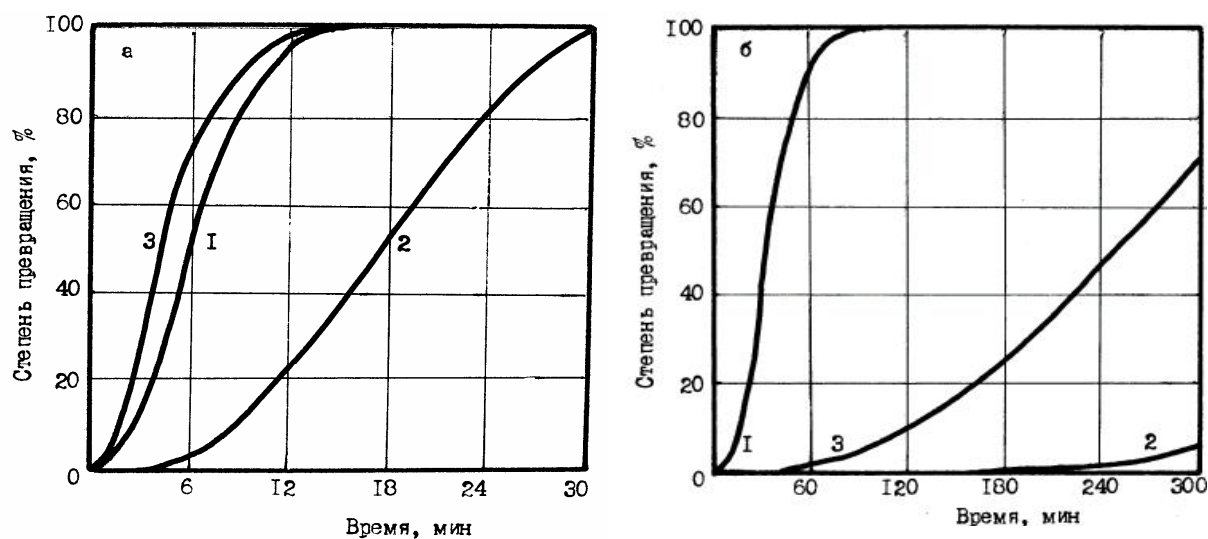


Рис. 2- Кинетические кривые распада аустенита сталей 7Х3(а) и Х5МФ(б) при 700 °С  
1- после нагрева на 840 °С; 2- после нагрева на 1150 °С; 3- после нагрева на 1150 °С  
и деформации на 50 % при 880-850 °С.

В этом случае повышение температуры нагрева образцов от 850 до 1150 °С приводило к увеличению устойчивости аустенита на начальной стадии распада примерно в 30 раз, а конец распада не достигался даже за 24 часа. Это, очевидно, связано в первую очередь с большим увеличением легированности аустенита вследствие полного растворения в нем карбидов. Деформация такого аустенита при 900 – 850 °С хотя и приводила к значительному понижению его устойчивости (рис. 2б), еще далеко не компенсировала действие высокотемпературного нагрева. В результате после горячей прокатки аустенит стали Х5МФ оказывается в 10-12 раз более устойчивым в перлитной области, чем после нагрева под отжиг. Ясно, что при такой ситуации отжиг стали Х5МФ с прокатного (ковачного) нагрева вряд ли будет рациональным.

Ранее выполненное исследование кинетики перлитного распада аустенита показало [3], что сталь Р6М5 значительно менее чувствительна к температуре нагрева, чем сталь Х5МФ, несмотря на гораздо более высокую легированность первой: время полного распада аустенита стали Р6М5 после нагрева под прокатку лишь в 5-6 раз было длительнее, чем после нагрева под отжиг. Так как деформация сильно понижает устойчивость аустенита, то при отжиге с прокатного нагрева длительность его перлитного распада примерно только вдвое больше, чем при обычном отжиге. Поскольку время полного распада аустенита при 700-780 °С после горячей прокатки не превышало 2-х часов [3], то ясно, что отжиг стали Р6М5 с прокатного нагрева с точки зрения кинетики перлитного превращения вполне возможен.

При сравнении данных, полученных на сталях Х5МФ и Р6М5, возникает вопрос, почему нагрев под прокатку более сильно увеличивает устойчивость аустенита менее легированной стали? Нам представляется, что это связано с большим различием структурного состояния сравниваемых сталей при 1150 °С. В стали Х5МФ карбиды полностью растворялись в аустените, тогда как в стали Р6М5 – меньше половины [2]. В связи с этим легированность аустенита быстрорежущей стали была относительно невысокой, а его зерно сверхмелким. Все это в совокупности с активизирующей ролью карбидов, по-видимому, и предопределило менее сильное повышение устойчивости аустенита у стали Р6М5 в результате нагрева под прокатку, чем у стали Х5МФ.

Изучение твердости и микроструктуры после отжига в основном подтвердило заключения, сделанные на основе анализа кинетики перлитного превращения аустенита. Результаты, полученные на сталях У8, 7Х3, Х5МФ и Р6М5, приведены в таблице 2. Из них

следует, что эвтектоидная и заэвтектоидные стали плохо отжигаются с деформационного нагрева, так как аустенит в этом случае распадается с образованием пластинчатого перлита,

Таблица 2 – Твердость и микроструктура сталей после изотермического отжига.

Марка стали	Режим обработки				Твердость НВ	Микроструктура
	Тем-ра отжига, °С	Время отжига, час	Тем-ра нагрева, °С	Темпер-ра деформации, °С		
У8	680	2	750	750-720	204	Мелкозернистый перлит
				без деформ.	207	Мелкозернистый перлит
			1150	750-720	220	Пластинчатый перлит
				без деформ.	223	Пластинчатый перлит
7Х3	680	3	820	820-800	229	Зернистый перлит + карбиды
				без деформ.	229	Зернистый перлит + карбиды
			1150	820-800	289	Пластичный перлит + карбиды
				без деформ.	311	Пластичный перлит + карбиды
Х5МФ	700	6	880	880-850	255	Зернистый перлит + карбиды
				без деформ.	255	Зернистый перлит + карбиды
			1150	880-850	388	Пластичный перлит + мартенсит + карбиды
Р6М5	740	4	880	880-860	235	Зернистый перлит + карбиды
				без деформ.	238	Зернистый перлит + карбиды
			1150	950-900	269	Зернистый перлит + карбиды
				без деформ.	277	Зернистый перлит + карбиды

что не допускается действующими стандартами. Данные табл. 2 свидетельствуют также о том, что при отжиге с прокатного нагрева отсутствует эффект термомеханического упрочнения, поскольку после одинаковой температуры аустенитизации деформированные на 50 % образцы имеют такую же или несколько меньшую твердость, чем недеформированные. Еще один результат, приведенный в табл. 2, обращает на себя внимание. Он свидетельствует о том, что сильно легированную заэвтектоидную сталь нерационально отжигать с прокатного нагрева также из-за чрезмерно высокой устойчивости аустенита.

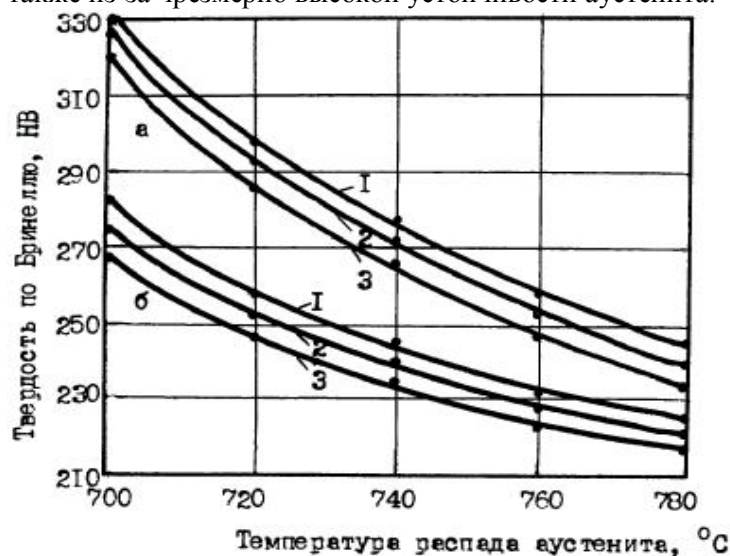


Рис. 3- Зависимость твердости стали Р6М5 от температуры и времени при отжиге с прокатного

Так как в стали Р6М5 при отжиге с прокатного нагрева формировалась зернистая структура, то на этой стали были проведены более разнообразные эксперименты. Из рис. 3 видно, что наиболее сильно на твердость стали влияет температура отжига, затем высокий нагрев совместно с деформацией и в меньшей мере – время изотермической выдержки. Если снижение твердости при повышении температуры отжига и увеличении его длительности является общеизвестным фактом, то повышение твердости в результате отжига с прокатного нагрева требует обсуждения. Так как эффект термомеханического упрочнения отсутствует, то вероят-

- нагрева (а) и обычного отжига (б)  
1- изотермическая выдержка 2 часа;  
2- изотермическая выдержка 4 часа;  
3- изотермическая выдержка 6 часов.

ными причинами этого явления могут быть:

- а) затруднение коагуляции вторичных и эвтектоидных карбидов;

б) старение аустенита при прокатке и охлаждении после прокатки.

Изучение микрошлифов при увеличении до 1000 крат не выявило заметных различий в микростроении образцов, подвергнутых обычному отжигу и отжигу с прокатного нагрева, поэтому вероятнее всего ответственным за повышение твердости является процесс старения. Косвенным подтверждением этого является выделение большого количества избыточных карбидов перед перлитным распадом [3] и существенное уменьшение разницы в твердости сравниваемых образцов при повышении температуры отжига (от 50 единиц НВ при 700 °С до 20 единиц при 780 °С). Последнее естественно связать с более значительным перестариванием деформированных образцов при повышении их температуры.

Заканчивая обсуждение, полученных в настоящей работе данных, с сожалением вынуждены констатировать, что вопреки утверждению авторов [5] отжиг изделий из эвтектоидных и заэвтектоидных сталей сразу после завершения горячей деформации (без дополнительной аустенизации) невозможен или крайне невыгоден. Что же касается ледебуритных сталей, то их отжиг с деформационного нагрева возможен, но с обязательной корректировкой температуры изотермической выдержки, или скорости охлаждения. Например, для получения требуемой стандартом твердости  $\leq 255$  НВ сталь Р6М5 с прокатного нагрева необходимо отжигать при температуре, не менее 760 °С, тогда как при обычном отжиге достаточно при 720 °С (рис. 3).

#### Выводы

1. Отжиг с деформационного нагрева эвтектоидных, заэвтектоидных и ледебуритных сталей вследствие высокого нагрева и горячей деформации отличается от обычного отжига существенно иным протеканием перлитного распада во времени и морфологией образующейся карбидной фазы.

2. В эвтектоидных и заэвтектоидных сталях вследствие полного растворения карбидов при нагреве под обработку давлением при охлаждении изделий после завершения горячей деформации формируется пластинчатый перлит, недопустимый по действующим стандартам.

3. В ледебуритной стали при отжиге с прокатного нагрева основная часть карбидной фазы, выделяется из аустенита в зернистой форме, в связи с чем такой отжиг при определенных параметрах охлаждения дает результаты, удовлетворяющие требованиям стандарта и экономики.

#### Перечень ссылок

1. Поляков В.В. Ресурсосбережение в черной металлургии / В.В. Поляков – М.: Машиностроение, 1993. – 320с.
2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали./ Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия. 1983 – 584с.
3. Khlestov V.M. Effects of deformation and heating temperature on the austenite transformation to pearlite in high alloy tool steels / V.M. Khlestov, E.V. Konopleva, H.J. Mc Queen // Materials Science and Technology.- Vol 18.- P.54-60.
4. Хлестов В.М. Превращения деформированного аустенита в стали./ В.М. Хлестов, Г.К. Дорожко. – Мариуполь: Издательство ПГТУ, 2002. – 407с.
5. Башнин Ю.А. Технология термической обработки./ Ю.А. Башнин, Б.К. Ушаков, А.Г. Секей. – М.: Металлургия, 1986. – 424с.
6. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка стали./ М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский, Л.М. Капуткина. – М.: Металлургия, 1983. – 480с.

Статья поступила 29.01.2003